AUS DEM PHYSIOLOGISCHEN INSTITUT DER UNIVERSITÄT BERLIN
DIREKTOR PROF. DR. HOFMANN

ÜBER DIE WESENTLICHEN TEILTÖNE DER DURCH DEN FERNSPRECHER ÜBERMITTELTEN VOKALE

AUSLÖSCHVERSUCHE AN VOKALKLÄNGEN

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE

EINES

DOKTOR MEDICINAE

DER

UNIVERSITÄT BERLIN

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

VON

KURT BERNARD EISENBERG
ASSISTENT AM HYGIENISCHEN INSTITUT DER UNIVERSITÄT BERLIN

GEDRUCKT MIT GENEHMIGUNG DER MED. FAKULTÄT DER UNIVERSITÄT BERLIN
DEKAN: PROF. DR. CSERNY
REFERENTEN: PROF. DR. HOFMANN
PROF. DR. GILDEMEISTER

TAG DER PROMOTION: 28. IV. 1926

(SONDERABDRUCK AUS PFLÜGERS ARCHIV FÜR DIE GESAMTE PHYSIOLOGIE
BAND 212, HEFT 3/4)

VERLAGSBUCHHANDLUNG JULIUS SPRINGER IN BERLIN. 1926

Zu den schon von *Helmholtz* verwendeten Verfahren zum Studium der Sprachlaute: Hervorhebung einzelner Teiltöne durch Resonatoren und Nachbildung aus künstlich gebildeten Tönen oder Klängen, sind in den letzten Jahrzehnten noch zwei andere gekommen, die eine Fülle von Ergebnissen geliefert haben. Wenn wir von unvollkommenen Vorversuchen absehen, so war *L. Hermann*[1]) der erste, der die Laute registrierte (mit Hilfe des Phonographen) und die erhaltenen Kurven nach den Regeln der *Fourier*schen Analyse in Teiltöne zerlegte. Diese Bestrebungen sind, wenigstens technisch, zu einem gewissen Abschluß gelangt durch die schönen Untersuchungen von *F. Trendelenburg*[2]).

Ebenso fruchtbar war der Versuchsplan von *Grützner* und *Sauberschwarz*[3]), durch Interferenzröhren einzelne Teiltöne des zu untersuchenden Klanges auszulöschen und aus der dadurch hervorgerufenen Entstellung Schlüsse auf die Bedeutung grade dieser Töne für den Sprachlaut zu ziehen.

Auf das ausgedehnte Schrifttum dieser Fragen soll hier nicht eingegangen werden; es sei vielmehr auf die ausführliche Besprechung in der Arbeit von *S. Garten*[4]) verwiesen.

Bekanntlich löscht eine Interferenzröhre nicht nur einen bestimmten Ton aus, sondern eine ganze Serie, deren Schwingungszahlen sich wie 1, 3, 5, 7 usw. verhalten, und sie verstärkt, wie besonders *Garten* (a. a. O.) betont hat, die Töne mit den Schwingungszahlen 2, 4, 6 usw.

---

[1]) *L. Hermann*, Phonophotographische Untersuchungen. Pflügers Arch. f. d. ges, Physiol. **45**, **47**, **48**ff.

[2]) *F. Trendelenburg*, Wissensch. Veröffentl. aus dem Siemenskonzern **3**, 43, 1924; **4**, 1. 1925. Naturwissenschaften 12. Jahrg., S. 661. 1924.

[3]) *E. Sauberschwarz*, Interferenzversuche mit Vokalklängen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **61**. S. 1. 1895.

[4]) *S. Garten*, Beiträge zur Vokallehre I. II. III. (III. gemeinsam mit *F. Kleinknecht*). Abhandl. d. mathem.-phys. Klasse d. Sächs. Akad. d. Wiss., Leipzig **38**. 1921.

Das ist ein ernster Nachteil des Verfahrens, der die Ergebnisse oft recht undurchsichtig macht. Deshalb ist es ein großer Fortschritt, daß in den letzten Jahren Auslöschungsmethoden ausgebildet sind, die sauberer zu arbeiten gestatten.

In der elektrischen Fernsprechtechnik besteht das Bedürfnis, Drahtleitungen gegen bestimmte Frequenzen abzuriegeln, während andere praktisch ungeschwächt hindurchgelassen werden sollen. Das ist möglich durch Kombinationen von Kondensatoren und Spulen: eine Doppelleitung, bestehend einerseits aus einem Draht, andererseits aus zahlreichen in Serie geschalteten gleichen Spulen, die immer zwischen je 2 Spulen von je einem Kondensator überbrückt wird, drosselt alle Wechselströme *oberhalb* einer durch die Größe der Kondensatoren und Spulen festgelegten Frequenz ab; andere Kombinationen begrenzen die durchgelassene Frequenz dagegen nach *unten* hin. Da es, freilich mit großem apparativem Aufwand, möglich ist, Sprachlaute praktisch unverzerrt in elektrische Stromschwankungen, diese wieder in Luftschwingungen zu verwandeln, haben wir hier ein ideales Mittel, um von einem Sprachlaut die hohen oder die tiefen Teiltöne zu vernichten, oder auch beide, unter Schonung des Mittelstücks. In bezug auf einige Ergebnisse dieses Verfahrens sei auf den Artikel von *K. W. Wagner*[1]) verwiesen.

Noch ehe diese letztgenannte Arbeit erschienen war, schlug mir Herr Professor *Gildemeister* im Jahre 1923 vor, mit Hilfe eines elektrischen Verfahrens aus einem Sprachlaut, in erster Linie aus einem Vokal, eine bestimmte Frequenz auszulöschen, also das zu machen, was sich mit Interferenzröhren (wegen der gleichzeitigen Vernichtung der ungradzahligen Obertöne) nicht durchführen läßt. Leitet man nämlich einen reinen sinusförmigen Wechselstrom, der in einem idealen Telephon einen reinen Ton ergibt, einer Wheatstoneschen Brückenanordnung aus Ohmschen Widerständen zu, von der der eine Zweig außerdem eine Spule und dazu in Serie geschaltet einen Kondensator enthält (das Schaltungsschema ist in der linken oberen Ecke der Abb. 1 zu ersehen), und beobachtet man wie bei einer Leitfähigkeitsmessung nach Kohlrausch mit einem Telephon den Erfolg einer Veränderung der Widerstände, der Spule und des Kondensators, so kann man leicht feststellen, daß nur in *einem* Falle völliges Schweigen des Telephons zu erzielen ist: wenn nämlich die 4 Widerstände miteinander die bekannte Proportion $a : b = c : d$ bilden, und wenn außerdem für die 3 Größen: sekundliche Schwingungsfrequenz N, Selbstinduktion L der Spule (in Henry) und Kapazität C des Kondensators (in Farad) die Gleichung gilt $N = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$. Sind also die Widerstände in dem richtigen durch die obige Proportion

[1]) *K. W. Wagner*, Elektrotechn. Zeitschr. 1924, S. 451.

dargestellten Verhältnis, so kann man in der Telephonleitung durch Veränderung von CL jede beliebige Frequenz auslöschen, aber jedesmal *nur eine einzige*, ohne daß die Obertöne wesentlich beeinflußt werden. Daraus folgt weiter, daß aus einem Tongemisch jede beliebige Komponente vernichtet werden kann.

Nach diesem Verfahren habe ich einige Sprachlaute untersucht, in erster Linie das gesungene A, indem ich den Auslöschbezirk zunächst auf den Grundton, dann stufenweise immer höher verlegte.

Methodik.

Wie schon in der Einleitung gesagt ist, müssen bei dem gewählten Verfahren die Laute zuerst in elektrische Ströme, dann diese wieder in Laute verwandelt werden. Uns standen dazu nur gewöhnliche Mikrophone und Telephone zur Verfügung, die bekanntlich die besagten Umwandlungen nicht treu vornehmen. Indessen wird, wie man aus dem täglichen Leben weiß, das Charakteristische der tieferen Vokale intakt gelassen. Wir haben also nicht denjenigen Laut untersucht, der aus dem Munde des Singenden kommt, sondern der aus einem guten Telephon heraustönt; ein A oder ein O bleibt dabei aber so charakteristisch, daß in unwissentlichen Versuchen niemals ein Zweifel entstehen kann.

Um eine Gewähr zu haben, daß der Sänger tatsächlich immer auf denselben Ton sang, mußte er diesen dauernd leise hören können. Daraus ergab sich nach einigen Vorversuchen folgende Anordnung: In einem sehr großen Zimmer befand sich in einer Ecke ein Röhrensummer, dessen Frequenz durch verschiedene Stöpselung eines Glimmerkondensators von maximal 0,9 Mikrofarad variiert werden konnte. Von diesem Summer wurden die elektrischen Schwingungen, die zur Eichung des Auslöschapparates und zur Führung der Vp. dienten, durch induktive Koppelung entnommen. In demselben Zimmer, aber etwa 5 m entfernt, stand der Auslöschapparat: eine Wheatstonesche Brückenanordnung, bestehend aus einem Meßdraht, einem im Zickzack aufgespannten Widerstandsdraht, einem Papierkondensator von 24 μ F und einer geeichten, im Bereich von 0,3—30 Millihenry stetig veränderlichen Selbstinduktion (bestehend aus 2 in verschiedenen Abteilungen gewickelten Spulen verschiedenen Durchmessers, die mehr oder weniger tief ineinander geschoben werden konnten). Die Vp. befand sich in einem Nebenzimmer, zu dem eine Leitung vom Summer und eine vom Auslöscher führte; sie hatte am Ohr ein Telephon und vor dem Munde ein Mikrophon.

Der Versuch zerfiel nun in folgende Teile: Zuerst wurde der Summer mit dem Auslöscher verbunden; es wurde dann durch viele Versuche festgestellt, wie der letztere Apparat für jeden Summerton eingestellt werden mußte. Da die Auslöschung nach der oben schon angeführten Kirchhoff-Thomsonschen Formel $N = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$ verläuft (N = sekundliche Schwingungszahl, C = Kapazität in Farad, also hier 0,000024; L = Selbstinduktion in Henry, hier von 0,030—0,0003 veränderlich), und da weiter die Spule geeicht war, so war, wenn es gelungen war, die Auslöscheinstellung zu finden, damit auch jedesmal die Frequenz des Summertones bestimmt[1]). Es zeigte sich dabei, daß auch die Tonerzeugung durch den Summer mit befriedigender Genauigkeit durch die obige Formel ausgedrückt wurde, was die Aufstellung der Eichtabellen sehr erleichterte.

[1]) Über diese sehr einfache und genaue Methode der Frequenzbestimmung siehe *M. Gildemeister*, Untersuchungen über die obere Hörgrenze. Zeitschr. f. Sinnesphysiologie **50**, 171. 1918.

Nun war also zweierlei bekannt: Erstens wie man den Kondensator des Schwingungskreises stöpseln mußte, um bestimmte Schwingungsfrequenzen zu erhalten. Zweitens, wie die Spule des Auslöschers eingestellt werden mußte, um bestimmte Frequenzen zu vernichten.

Nach diesen Vorarbeiten, die nur einmal gemacht zu werden brauchten, begannen die eigentlichen Versuche. Der Summer wurde auf den Grundton (die Singnote) des zu untersuchenden Vokales eingestellt und mit der Leitung nach dem Nebenzimmer verbunden. Die Vp. hörte nun einen Ton ganz leise im Telephon erklingen[1]). Darauf sang sie einen verabredeten Vokal auf diese Note mehrmals hintereinander je 10 Sekunden lang. Das Mikrophon, das vor der Vp. stand, war dabei mit dem Auslöscher im Nebenzimmer verbunden. Dort saßen 2 Beobachter und belauschten in ihren Telephonen den Laut (der manchmal noch durch einen Röhrenverstärker gekräftigt wurde), während die variable Spule noch kurzgeschlossen war. Da dann ja noch keine Auslöschung stattfindet, klang der Laut so, wie er in einem guten Telephon zu klingen pflegt; ein tieferer Vokal, besonders A und O, erscheint fast unverändert, das lange U bekommt etwas Fremdartiges, das E ist nur mäßig gut, noch weniger befriedigend ist das lange I. Nun wird der Auslöscher beispielsweise auf den Grundton (Sington) eingestellt, so daß dieser Ton in der Telephonleitung unterdrückt ist. Der dadurch veränderte Laut wird durch zeitweisen Kurzschluß der Spule immer mit dem unveränderten verglichen. Dann werden andere Tonbereiche ausgelöscht, z. B. die einzelnen harmonischen Obertöne usw. Die dazu nötige Spuleneinstellung ist ja von der vorherigen Eichung her bekannt. Der uns zugängliche Bereich des Auslöschens war begrenzt durch die Konstanten unserer Apparate; wir kamen bis etwa 4200 Schwingungen.

Ehe ich diese Ergebnisse mitteile, möchte ich noch darauf hinweisen, daß das Auslöschen bei unserer Vorrichtung auch auf elektrischer Resonanz beruht, die sich bei der gewählten Anordnung in negativem Sinne bemerkbar macht. Wir haben es, um einen jetzt oft gehörten Ausdruck zu brauchen, mit einem *Sperrkreis* zu tun. Eine Resonanzkurve ist aber immer abgerundet, d. h. wenn auch nur eine bestimmte Frequenz vollständig unterdrückt wird, so werden die benachbarten doch geschwächt, und zwar desto mehr, je näher sie der ausgelöschten liegen. Da wahrscheinlich in einem Tongemisch die Töne, deren Intensität unter eine gewisse Schwelle gesunken ist, nicht mehr für die Klangfarbe in Betracht kommen werden, so erstreckt sich die Auslöschung praktisch immer auf einen gewissen endlichen Bereich. Es ist also zu verstehen, daß es für den Klang gleichgültig war, ob wir die Spule ganz genau so einstellten, daß sie einen gewissen Oberton unterdrücken mußte, oder ein wenig anders. Es wäre also auch ein vergebliches Be-

[1]) Es muß dafür gesorgt werden, daß dem Summer hierbei oder bei der Eichung nicht zuviel Energie entzogen wird, weil sich dann seine Frequenz ändern kann.

mühen, z. B. den 15. Oberton eines Klanges allein auslöschen zu wollen; auch der 14. und 16. werden dabei sehr stark geschwächt werden. Wahrscheinlich könnte man die Resonanzkurve durch Benutzung von Spulen großer Selbstinduktion und kleinen Ohmschen Widerstandes noch viel spitzer, also die Einwirkung auf die Nachbartöne geringer machen, als es uns gelungen ist.

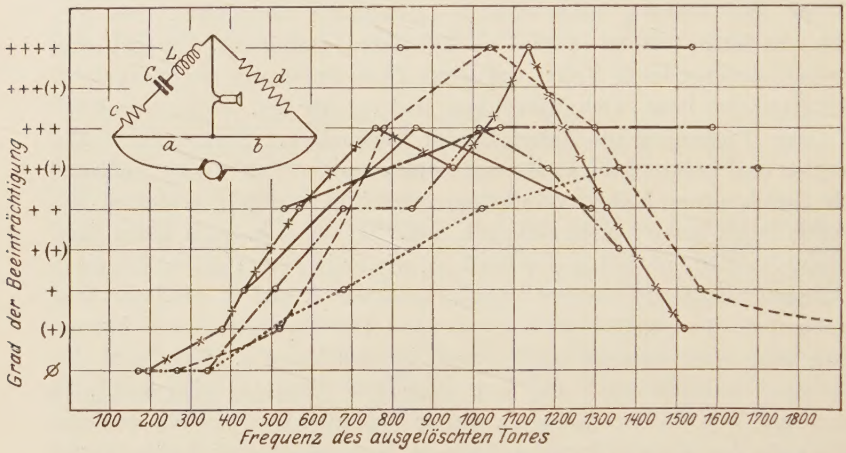

Abb. 1. Links oben: Schaltungsschema zur Auslöschung einzelner Töne (siehe S. 575). Rechts: Darstellung der Beeinträchtigung eines gesungenen A, wenn die durch kleine Kreise ○ ○ ○ bezeichneten Teiltöne ausgelöscht werden. Die Bedeutung der links angebrachten Zeichen ist unter Tab. 1 zu ersehen. Ergebnis: die größte Schädigung liegt um 1000 herum. Auslöschung unter 400 bleibt unbemerkt.

—·—·—·— Singnote 170 ---------- Singnote 340 —·—·—·— Singnote 530
—×—×—×— „ 190 ———— „ 430 —·——·——·— „ 770
— — — — — „ 260

Ergebnisse.

Die Versuchspersonen waren 3 Männer und 2 Knaben; die Singnoten (in sekundlichen Schwingungszahlen) etwas abgerundet 170 (f), 190 (g) und 260 (c_1) bei den Männern, 260, 340 (f_1), 430 (a_1), 530 (c_2) und 770 (g_2) bei den Knaben. Die Protokolle wurden in folgender Weise geführt:

Sänger: W. F., 13 Jahre alt. Hörer: M. G. und K. E. Vokal A, Singnote 260 (c_1).

Ausgelöschte Frequenz		
Teilton	Schwingungszahl	Erfolg
1	260	Vokal unverändert.
2	520	Ebenso.
3	780	Etwas weniger voll.
4	1040	Stark beeinträchtigt, brummend.
5	1300	Sehr geschädigt.
6	1560	Reines A*.
16	4160	Fast vollkommen gut.

* Die Vp. sang Ao, d. h. ein etwas nach O hin klingendes A. Die O-Beimischung verschwand bei dieser Einstellung.

Es würde nun zu weit führen, wollte ich die Resultate unserer zahlreichen Versuche, die sich vorwiegend auf das lange A (wie im Worte Hahn), außerdem noch auf O (wie in Sohn), U (wie Uhr), E (wie See) und I (wie Knie) erstreckten, ausführlich mitteilen. Ich möchte nur auf die Veränderungen eingehen, die nach Auslöschung des *Grundtones* eintreten (was ja mit Interferenzröhren gesondert nicht möglich ist), und im übrigen auf die nebenstehende Tabelle verweisen.

Wird der Grundton vernichtet, so hat das auf den Vokalklang *gar keinen Einfluß*, wenn er nicht mehr als 260 Schwingungen hat. Der Klang behält alle vorherigen Eigenschaften, insbesondere auch seine Tonhöhe. Bei 340 verliert er an Fülle, noch mehr bei 530, und von 530 an springt er in die nächsthöhere Oktave und verliert seinen Vokalcharakter.

Das stimmt mit den Ergebnissen der *Hermann*schen Analysen überein, nach denen in Vokalen auf tiefere Noten der Grundton kaum vertreten ist. Auch *Stumpf*[1]) gibt an, daß man zum Aufbau eines tiefen A den Grundton nicht brauche. Offenbar genügen in dieser Tonlage die (subjektiven, oder in unserem Falle auch durch das Telephon hineingebrachten) Differenztöne, um den Grundton genügend kräftig hervortreten zu lassen. Sie genügen aber nicht, wenn sich die Stimmnote dem nach allen Untersuchern für alle Vokale wichtigen Frequenzbereich von 500—1500 nähert.

[1]) *C. Stumpf*, Sitzungsber. d. Berliner Akad. d. Wiss. XVII, S. 333. 1918.

Tabelle 1.
Schädigung des Vokals A durch Auslöschung einzelner Teiltöne.

Grundton	Ausgelöschter Teilton	Frequenz	Erfolg
170	1	170	ø
	2	340	ø
	3	510	+
	4	680	++
	5	850	++
	6	1020	+++
	7	1190	++(+)
	8	1360	+(+)
190	1	190	ø
	2	380	(+)
	3	570	++
	4	760	+++
	5	950	++(+)
	6	1140	++++
	7	1330	++
	8	1520	(+)
260	1	260	ø
	2	520	(+)
	3	780	+++
	4	1040	++++
	5	1300	+++
	6	1560	+
	16	4160	(+)
340	1	340	ø
	2	680	+
	3	1020	++
	4	1360	++(+)
	5	1700	++(+)
430	1	430	+
	2	860	+++
	3	1290	++
530	1	530	++
	2	1060	+++
	3	1590	+++
770	1	770	++++
	2	1540	++++

Zeichenerklärung: ø = kein Einfluß; + = weniger Fülle des Klanges; ++ Beeinträchtigung des Vokals; +++ = starke Schädigung des Vokalcharakters; ++++ = unbestimmter Laut: bei 770 (1) [oft auch bei 530 (1) springt der Gesangston in die höhere Oktave]; (+) = die Aussage ist nicht ganz sicher.

Auf die Ergebnisse in bezug auf die anderen Vokale möchte ich hier noch nicht näher eingehen, da sie noch nicht genügend klar sind.

Die Tab. 1 wird sehr anschaulich, wenn man sie in Form einer Kurvenschar darstellt. In Abb. 1 sind als Ordinaten die Schwingungszahlen der ausgelöschten Frequenzen als Abszissen der Grad der Beeinträchtigung gewählt, d. h. die Kurven erheben sich desto mehr von der Nullinie, je mehr der Vokal verunstaltet ist. Man sieht deutlich, daß das Gebiet der Schädigung für A um 1000 herum liegt, mit einem Spielraum von etwa 200 Schwingungen nach oben und unten. Diese Breite kommt teilweise daher, weil ja bei manchen Singnoten kein Oberton in der Nähe von 1000 liegt.

Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren.

Nach dem Vorgange *Nagels* möchte ich das für das lange A charakteristische Tongebiet (Formantgebiet nach *Hermann*) hier kurz zusammenstellen. Theoretische Fragen sollen beiseite gelassen werden.

Autor	Methode	Note	Frequenz (abgerundet)
Helmholtz	Resonator	b_2	920
	Synthese	b_2	
König	Resonator	f_2—b_2	920
Auerbach	Perkussion		690—920
Hermann	Analyse	Mitte der zweigestr. Okt.	700—900
Pipping	Resonator	gis_2 und dis_3	820—1230
Stumpf	Auslöschung	g_2—b_2	780—920
	Synthese		
Garten	Resonator	h_2—c_2	um 1000
	Auslöschung		
Köhler	Auslöschung	h_2	um 1000
Eisenberg	Auslöschung		800—1200

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, ist die Übereinstimmung meiner Befunde mit früheren Untersuchungen recht gut; bei weiterer Ausbildung der Methode wird es wohl möglich sein, auch andere Vokale als A zu studieren und ihre charakteristischen Gebiete scharf einzuengen[1]).

[1]) *Anm. bei der Korrektur:* Herr Professor *Gildemeister* macht mich auf eine neuere amerikanische Arbeit aufmerksam, die mit der vorliegenden verwandt ist. *H. Fletcher* [Physic. Rev. (1) **23**, 427, 1924] hat durch elektrischen Filter Vokale von unten her abgebaut, d. h. zuerst den Grundton, dann diesen mit dem ersten Oberton, dann Grundton + 2., + 3. Oberton ausgelöscht usw. Bei ah (entsprechend dem deutschen A), das auf d = 145 gesungen war, wurde gefunden, daß Auslöschung des Grundtones keinen Einfluß, Auslöschung des Grundtones und der beiden ersten Obertöne (145 + 290 + 435) geringen Einfluß auf die Vokalqualität hat. Höhere Singnoten wurden anscheinend nicht verwendet.

Zusammenfassung.

In der vorliegenden Arbeit werden Vokaluntersuchungen beschrieben, die nach einer neuen Methode angestellt sind, die aus einem Klange einen einzelnen Teilton ohne Mitbeteiligung der Obertöne auszulöschen erlaubt. Da die Klänge dabei in elektrische Ströme, diese durch Telephone wieder in Klänge verwandelt werden müssen, ist dabei eine geringe Veränderung des Klangcharakters nicht zu vermeiden.

Diese Verzerrung ist sehr gering beim langen Vokal A. Dieser wird hinsichtlich des Einflusses der Auslöschung einzelner Teiltöne untersucht; er wird dabei von Männer- oder Knabenstimmen auf Noten zwischen 170 (f) und 770 (g_2) gesungen.

Auslöschung des Grundtones ist ganz ohne Einfluß auf den Vokalcharakter und die subjektive Tonhöhe für Singnoten unterhalb 400; von da an wird der Vokal mehr und mehr entstellt und springt schließlich in die höhere Oktave über.

Auslöschung eines Obertones stört den Vokal A dann am meisten, wenn dieser Ton in den Bereich 800—1200 fällt, mit einem Maximum um 1000 herum. Das ist in Übereinstimmung mit den Angaben anderer Autoren. Die Versuche mit anderen Vokalen haben noch keine deutlichen Ergebnisse gebracht.

Lebenslauf.

Als Sohn des Kaufmannes *Robert Eisenberg* am 29. 8. 1899 in Berlin geboren, besuchte ich von Michaelis 1905 bis Mai 1918 das Sophien-Gymnasium in Berlin, war von Mai 1918 bis November 1918 im Militärdienst und machte im Oktober 1918 am Friedrichs-Werderschen Gymnasium die Kriegsteilnehmerprüfung. Ich studierte dann im Winter-Semester 1918 bis 1919 an der Berliner Universität Medizin, im Sommer-Semester 1919 und Winter-Semester 1919 bis 1920 in Freiburg i. B. und dann wieder in Berlin bis zum Sommer-Semester 1923. Nach dem 5. Semester bestand ich die ärztliche Vorprüfung, nach dem 10. Semester die ärztliche Prüfung in Berlin. Am 1. Mai 1924 trat ich in das praktische Jahr ein, das ich an der inneren und der bakteriologischen Abteilung des städtischen Krankenhauses im Friedrichshain und im Hygienischen Institut der Universität Berlin absolvierte. Am 16. Juni 1925 erhielt ich die Approbation als Arzt und wurde Volontärassistent am Institut. Seit dem 15. Oktober 1925 bin ich als außerplanmäßiger Assistent am Institut angestellt.